

IL PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA PROBLEMATICHE GEO-SISMOTETTONICHE e AMBIENTALI

Giuseppe Mandaglio* e Maria Clorinda Mandaglio**

Abstract

To create the stable connection between Sicily and Calabria, different types of works have been proposed such as sub-channel tunnels, suspension tunnels, single span bridges, and two or three span bridges. The choice of technicians and numerous multidisciplinary commissions fell on the single span bridge, to build in the area where the two banks of the Strait of Messina are closest and their distance is greater than 3.000 m.

The bridge structure is a very complex work - the central span has sizes never designed before - which required tackling new problems in the design and applying advanced survey methods and techniques to deepen geological, seismological, geotechnical, and environmental knowledge of the area where it will be constructed. The area is also characterized by a high seismic activity.

The main geo-seismotectonic and environmental issues to be investigated in more detail according to the commissions that examined the project were:

- Integration of historical geo-seismic-tectonic studies with the most up to date geostructural and seismogenic knowledge of the Strait Area.
- In depth reconstruction of the geological, hydrogeological, and geotechnical models in the foundation areas of the towers and tunnels also to prevent the danger of subsidence.
- Deepening of the hydrogeological studies for the protection of the Ganzirri Pantani and the connecting channel.

For this purpose, numerous research institutions and experts in structural geology, seismology, applied geology and geotechnics have carried out studies and investigations whose results have allowed to reconstruct the layout of the vast area interested by the project, to identify the characteristic and the design earthquake, to define the geological and geotechnical models of the sites, and to improve the environmental inclusion of the bridge by preventing or mitigating the impacts in the “delicate” environment of the Strait of Messina.

In particular, the geostructural and seismotectonic knowledge of the Graben in which the strait falls have been deepened, the moment magnitude ($M_w = 7.1$) of the 1908 earthquake has been established, and the geological and geotechnical models of the foundation areas of the towers, of anchorages, of tunnel passages and of minor structures have been reconstructed.

The report will describe some of the geostructural and seismotectonic knowledge that accompanied the design in the “Strait of Messina” area where to the high seismicity considerable geological, hydrogeological, geotechnical, and environmental complexities are added.

* Geologo. Presidente del Centro di Osservazione e Ricerca sui Rischi Naturali e Ambientali. Docente di Geologia applicata in area sismica.

** Università di Salerno

1. Caratteristiche principali del Progetto

Dall'immagine che segue si può avere un'idea dell'imponenza del ponte e del paesaggio in cui sarà inserito. Nella tabella sono riportati i dati salienti della struttura.



Fig. 1 - Fotocomposizione del ponte sullo Stretto di Messina e dati tecnici della struttura.

Tipo di Ponte: **Sospeso**

- Lunghezza campata centrale : **3.300 m**
- Lunghezza campate laterali: **3.666 m**
- Larghezza impalcato : **60,4 m**
- Resistenza a vento fino a **270 km/h**

Sistema di sospensione:

- N° 2 torri alte : **399 m**
- Cavi in fili di acciaio speciale : **N° 4**
- Diametro di ogni cavo: **126 cm**
- Fili per ogni cavo: **N° 44.323**

Fondazione Torre: Plinti circolari

- Diametro **48 m** Calabria
- Diametro **55 m** Sicilia:

Fondazione Ancoraggio

Volume Calabria : **229.900 m³**
 Volume Sicilia : **303.300 m³**
 Volume fuori terra : **17%**

Canale navigabile per transito grandi navi Sezione : **600 x 65/70 m**

Si tratta di una struttura imponente da realizzare nello Stretto di Messina dove le caratteristiche geostrutturali e tettoniche dell'Arco Calabro-Peloritano danno origine ad una sismicità elevata, a un assetto geologico e morfo-batimetrico complessi e ad aspetti idrogeologici e ambientali le cui problematiche condizionano le scelte progettuali anche dal punto di vista tecnologico per cui vanno attentamente definite e considerate a partire da quelle geologiche, strutturali e sismotettoniche.

2. Aspetti geo-strutturali e sismotettonici

L'Arco Calabro Peloritano è costituito da frammenti di crosta continentale che, in seguito all'apertura del *Bacino tirrenico*, si sono staccati dal blocco Sardo-Corso e si spostano, per sovrascorrimento passivo, verso sud-est e verso il Bacino ionico. L'Arco è formato da un basamento di plutoniti e metamorfiti di età ercinica che lo differenziano nettamente dalla Catena appenninica verso nord e dalle Maghrebidi siciliane verso sud-ovest, sul quale appoggia in forte discordanza una copertura sedimentaria post-mesozoica.

La continuità geo-strutturale dell'Arco è interrotta da faglie litosferiche a direzione NW-SE che lo dividono in blocchi, mentre altri sistemi di faglie a direzione NE-SW controllano l'assetto longitudinale della catena.

Alcune tomografie sismiche e gli ipocentri dei terremoti hanno evidenziato che l'Arco è collocato su un piano di subduzione immergente a NW lungo il quale la litosfera oceanica ionica descrive una curvatura a ginocchio per immergersi sotto la crosta calabra e poi disperdersi nel mantello sotto l'astenosfera tirrenica. Lo Stretto di Messina si colloca fra la terminazione continentale dell'Arco Calabro e l'appendice insulare dove la subduzione ionica genera strutture di compressione sul fronte di avanzamento e strutture distensive e di sprofondamento sulla parte opposta. L'innalzamento dell'Aspromonte, più pronunciato rispetto ai Peloritani, accentua la depressione dello Stretto rendendola asimmetrica pur conservando la struttura a Graben o almeno a semi-graben. Dai caratteri geo-strutturali derivano fenomeni tettonici evidenziati anche dalla elevata sismicità storica e attuale.

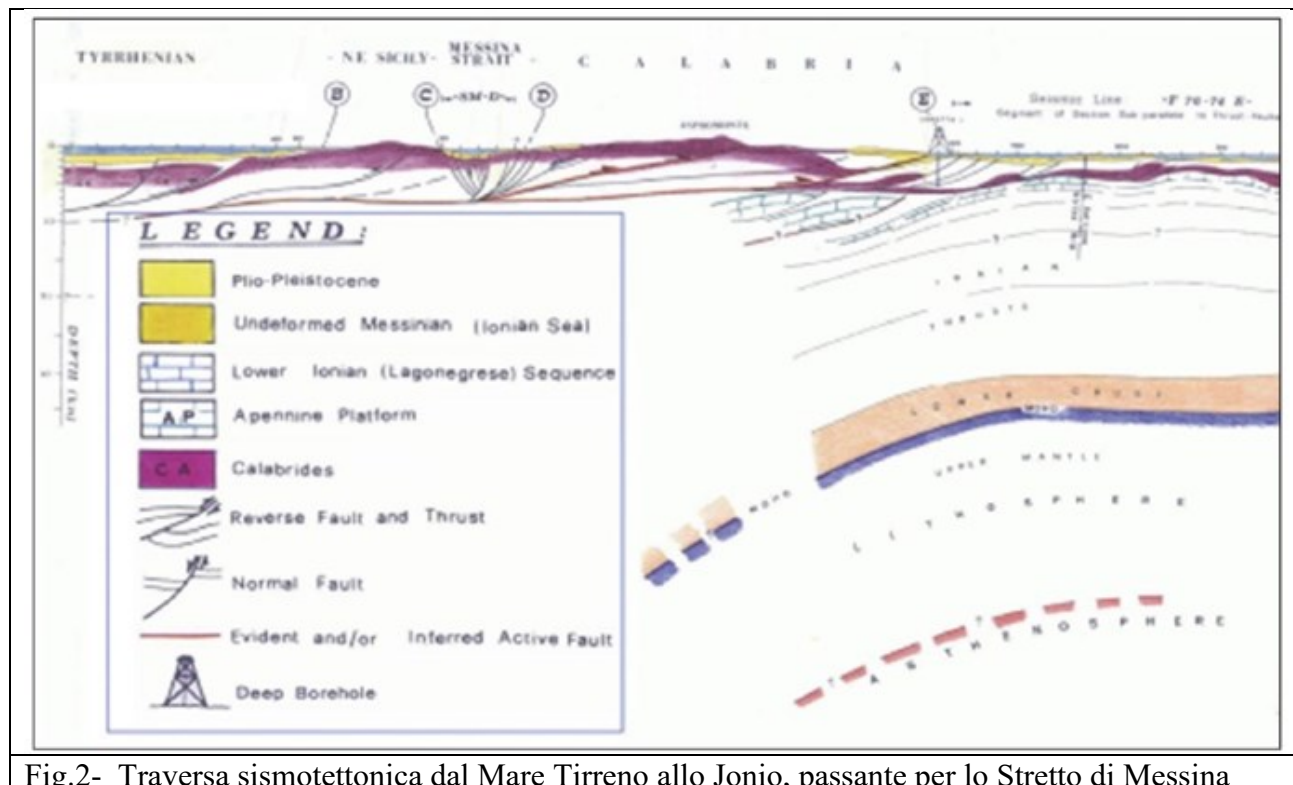


Fig.2- Traversa sismotettonica dal Mare Tirreno allo Jonio, passante per lo Stretto di Messina

2.2 Geologia dello Stretto e sismogenesi

Geologi, sismologi e studiosi di varie discipline, dopo il catastrofico terremoto del 1908 hanno focalizzato la loro attenzione sulla geologia dello Stretto alla ricerca delle cause del terremoto e della sorgente sismica.

Ma le ricerche scientifiche, stimolate dall'ipotesi di collegamento stabile fra le due sponde sono divenute più continue a partire dalla seconda metà del secolo scorso quando il Terremoto del 1908 con la sua intensità distruttiva e con la magnitudo nel frattempo ricostruita ($M \approx 7.1$) imposero la sismicità come primo problema da studiare. La geologia dello Stretto fu ri-esaminata e fu rivolta particolare attenzione alle faglie e agli aspetti di interesse sismologico (scarpate di faglia, alterazioni del regime idrologico, variazioni geomorfologiche e morfometriche ecc.); le faglie sismogenetiche furono confrontate con la Magnitudo del terremoto del 1908 e furono costruiti modelli per valutare la pericolosità sismica (su base geologica), il potenziale sismogenetico, La ricorrenza dei terremoti storici più distruttivi e la probabilità di eccedenza di determinati livelli di scuotimento da porre a base del terremoto di progetto.

In questa fase delle ricerche fu determinato l'età geologica dello Stretto (Plio-Pleistocene), lo spostamento tettonico dell'Arco Calabro e del blocco aspromontano, il cui scorrimento verso Sud-Est - in roll back sullo slab ionico immergente a Nord-Ovest - ha prodotto fenomeni estensivi della

crosta calabra e una perdita di massa rimpiazzata da processi di accomodamento sopra la cerniera della subduzione. Alla scala del sistema geodinamico della subduzione che investe il bacino di retro-arco (litosfera tirrenica fino al mantello), lo Stretto rappresenta una struttura complessa dove possono verificarsi terremoti di magnitudo analoga a quella del terremoto del 1908 (Mw 7.1).

Con la ripresa delle ricerche per il progetto definitivo del ponte, applicando nuove tecniche di analisi, si sono avute ricostruzioni sismologiche sempre più affinate che hanno aggiunto maggiori dettagli sulla sismicità. In particolare, il terremoto del 1908 è stato confermato come terremoto di riferimento per la progettazione del ponte con tempo di ricorrenza “storica” non inferiore a 1000 anni, e la sua origine è stata attribuita a una faglia cieca (*blind fault*).

2.3 Le faglie e la struttura dello Stretto

Secondo alcuni ricercatori, il terremoto sarebbe stato originato e avrebbe agito in una struttura a Graben controllata da numerose faglie diversamente orientate – alcune attive - ma la faglia sismogenetica principale resterebbe una blind fault.

Per altro, le peculiarità morfo-tettoniche dello Stretto non possono essere attribuite a quella faglia e il sollevamento tettonico regionale non può da solo giustificare le complessità geo-strutturali per cui bisogna richiamare processi e deformazioni preesistenti.

La faglia sismogenetica principale non può essersi attivata prima di 700.000 anni fa e lo slip rate è di circa 1.4 mm/anno. Questo valore, confrontato con la posizione e con la geometria della faglia, può giustificare una subsidenza massima di circa 0.7 mm/anno lungo l’asse dello Stretto per cui l’evidenza topografica non dovrebbe risaltare per più di 500 metri. Ma il contrasto strutturale e topografico fra il fondo dello Stretto e la sommità dei rilievi al contorno (Aspromonte, Peloritani) raggiunge e supera i 2.500 metri, e ciò può essere attribuito solo parzialmente ($\approx 500\text{m}$) alla geostruttura sismogenetica. Ciò implica che la struttura a Graben è stata causata da eventi tettonici precedenti, la faglia responsabile del terremoto del 1908 si è attivata nella fossa tettonica che già separava la Sicilia dalla Calabria e i suoi effetti si sono sovrapposti.

La ricostruzione geologica e strutturale dello Stretto è rappresentata nella figura che segue.

Dall’esame della figura emerge che la sponda calabra e il fondale adiacente sono attraversati da faglie distensive che, pur con minore frequenza, sono presenti anche sul fondale adiacente alla sponda sicula per cui la struttura a graben si ripete anche nella successione sedimentaria sovrastante al basamento cristallino metamorfico.

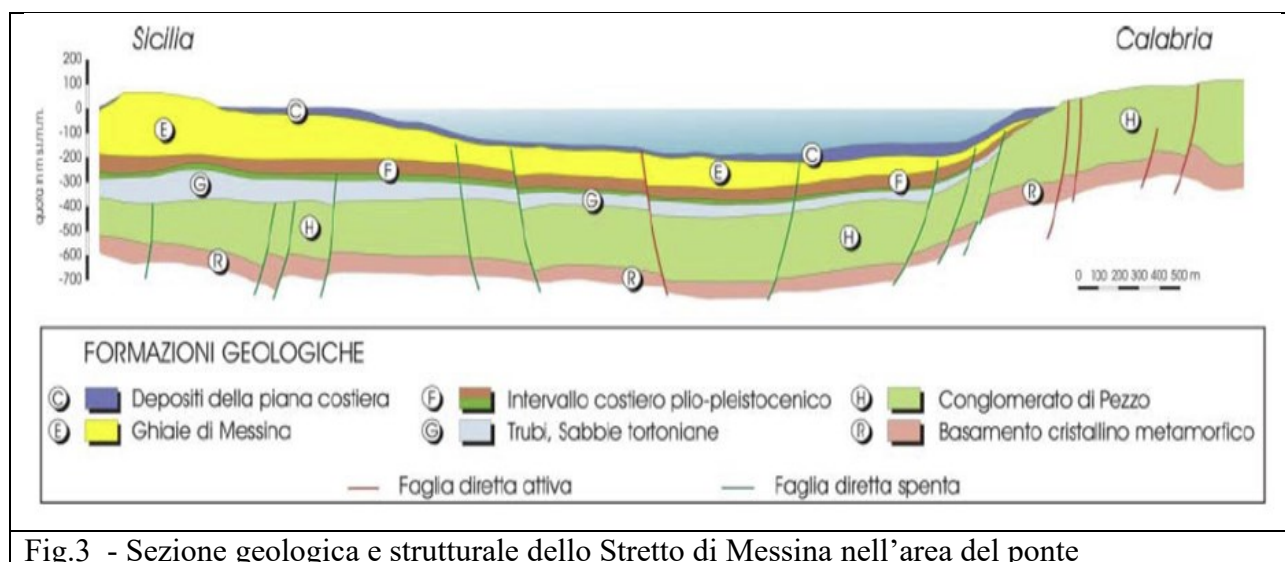


Fig.3 - Sezione geologica e strutturale dello Stretto di Messina nell’area del ponte

2.4 Il terremoto caratteristico

Le deformazioni antiche e quelle attuali hanno indotto a stabilire che:

- il terremoto caratteristico dello Stretto è quello del 1908 (Magnitudo 7.1) con tendenza a ripetersi con le stesse caratteristiche (lunghezza di faglia, slip, magnitudo);

- nello Stretto possono verificarsi terremoti di magnitudo intorno a 6, con maggiore frequenza e ancora pericolosi ;
- il *tempo di ricorrenza* del terremoto caratteristico oscillerebbe intorno ai 1000 ± 300 anni e troverebbe conferma nei dati storici e archeologici per i quali il solo terremoto paragonabile a quello del 1908 può essere accaduto verso la metà nel IV secolo.

Una sorgente sismogenetica alternativa al terremoto del 1908 basata su linee sismiche potrebbe essere una faglia trascorrente destra con geometrie strutturali a fiore orientata N-S e situata nella parte meridionale dello Stretto. La struttura si svilupperebbe sul fondo dello Stretto fino ad emergere e disperdersi all'altezza di Messina.

Altri studi geofisici hanno individuato a sud di Capo dell'Armi e dell'imboccatura dello Stretto una nuova faglia lunga 30 km, orientata NW-SE e immergente a Ovest. Ma questa faglia non sarebbe compatibile con le intensità macrosismiche del terremoto del 1908 e tutt'al più potrebbe essersi attivata insieme alla faglia cieca immergente a Est che ha originato il terremoto.

Altri ricercatori hanno ripreso il modello impostato sullo schema tettonico del Mediterraneo centrale di Doglioni et al. già proposto da ricercatori dell'INGV. I risultati dell'applicazione modellistica indicherebbero che il terremoto del 1908 sarebbe stato prodotto da una faglia normale, cieca e a basso angolo, capace di attivare/riattivare strutture secondarie ad alto angolo (v. figura 3).

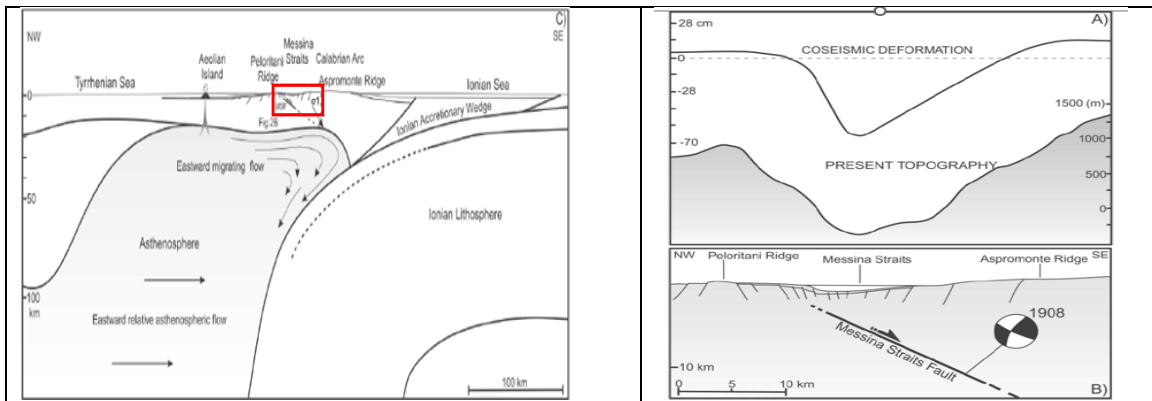


Figura 3 – Sezione schematica attraverso l'Arco Calabro e il Mar Tirreno a sx . Sezione schematica dello Stretto di Messina con la faglia sismogenetica del terremoto del 1908 e le faglie sovrastanti. (Doglioni et al., 2001)

Questa ipotesi è stata indagata con un modello analogico della deformazione tettonica dello Stretto, simulando l'attività di una faglia distensiva, a basso angolo e immergente verso est, e valutando gli effetti provocati dalla faglia sulle strutture secondarie sovrastanti. Tale approccio ha permesso di osservare che le faglie superficiali ad alto angolo emergenti nello Stretto sarebbero l'espressione dell'attività della *master fault* sottostante. (v. figura 4).

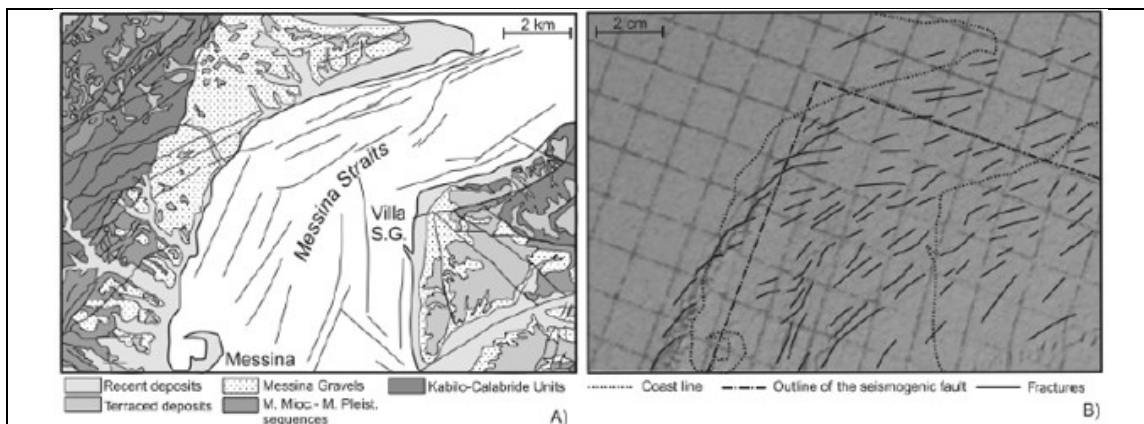


Fig. 4 – A) Faglie osservate nello Stretto di Messina. B) Faglie derivanti dal modello analogico.

Il modello concilia i dati geologici, tettonici e sismologici disponibili in un unico modello per il quale i terremoti principali sarebbero generati dalla struttura profonda a basso angolo, mentre la sismicità minore dipenderebbe dalle faglie superficiali di minore estensione.

Nel modello può trovare collocazione anche la faglia di Scilla, responsabile della scossa sismica (MW= 5.9 - 6.0) del 6 febbraio 1783, il cui segmento sud-occidentale interessa l'area degli ancoraggi del ponte sulla sponda siciliana, mentre le faglie che ricadono al largo dell'allineamento Cannitello Punta Pezzo interessano le fondazioni del ponte sul versante calabrese.

In tempi recenti uno studio dell'Università di Catania, dell'Università di Kiel e dell'INGV di Catania, utilizzando tomografie sismiche, dati geomorfologici e sismologici, avrebbe individuato la posizione della faglia 1908 riportata nella figura che segue.

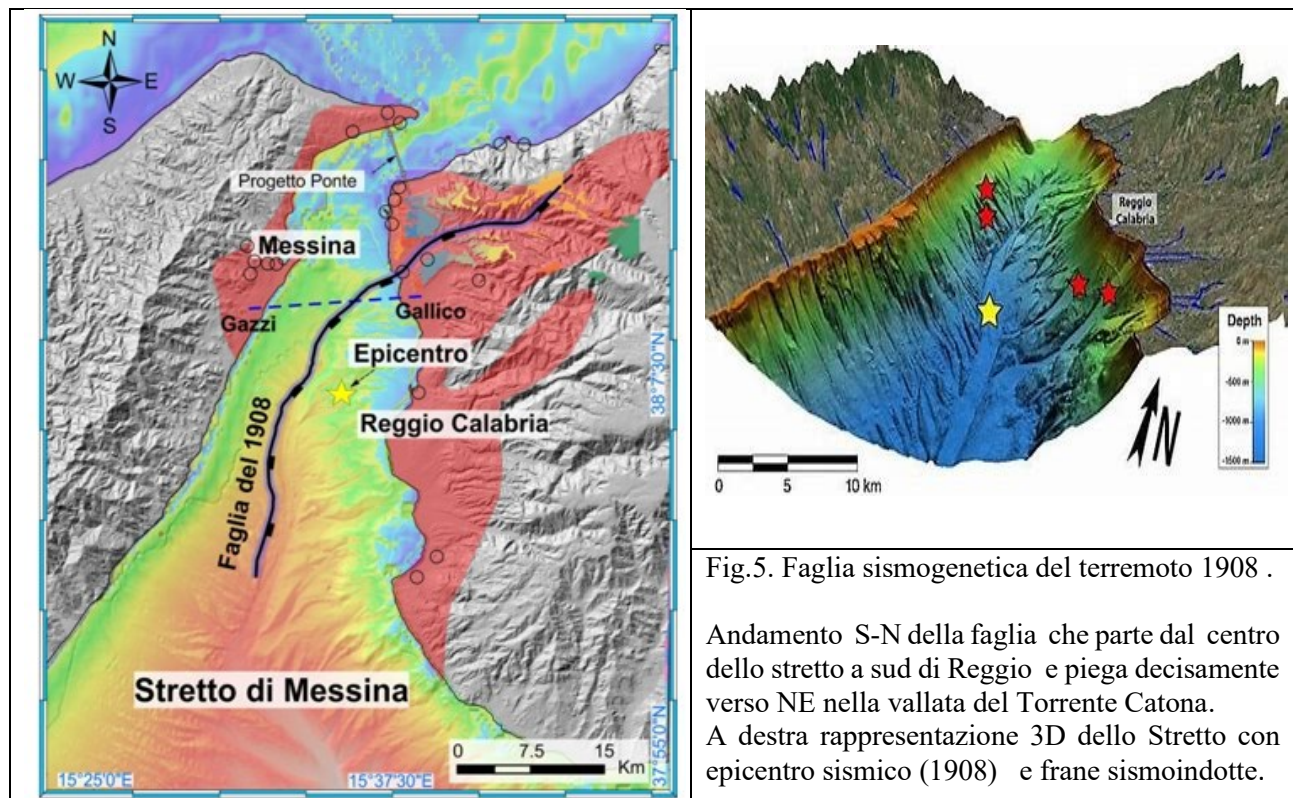


Fig.5. Faglia sismogenetica del terremoto 1908 .

Andamento S-N della faglia che parte dal centro dello stretto a sud di Reggio e piega decisamente verso NE nella vallata del Torrente Catona. A destra rappresentazione 3D dello Stretto con epicentro sismico (1908) e frane sismoindotte.

Si tratterebbe di una faglia lunga 34.5 km e immergente a Est, che seguirebbe l'asse dello Stretto da sud verso nord fino all'altezza di Messina da dove piegherebbe verso NE nella valle del Torrente Catona per costeggiare l'alto strutturale di Campo Piale. Il potenziale sismogenetico stimato è tale da generare terremoti di magnitudo fino a 6.9, molto simile a quella del terremoto del 1908.

Anche questo studio individua in 3.5 mm/anno l'allontanamento tra Calabria e Sicilia e colloca la faglia sopra una discontinuità geostrutturale profonda e immergente a est, sulla quale si sposterebbe il Graben dello Stretto e buona parte dell'Aspromonte con possibilità di generare/attivare faglie nella zona soprastante.

Altri studiosi, applicando l'approccio neo-deterministico (NDSHA) e i parametri della pericolosità sismica locale [Accelerazione di Picco (PGA), Spostamento (PGD) e Velocità (PGV)] hanno calcolato in maniera "conservativa" la Magnitudo di progetto con la relazione

$$M_{\text{design}} = M_{\text{max}} + Y_{ME\theta M}$$

in cui M_{max} è la Magnitudo Massima e il secondo termine rappresenta multipli (ME) della deviazione standard (θM).

Da tale procedura è derivato che il *massimo livello del rischio sismico* avrebbe magnitudo $M = 7.7$, limite massimo teorico che non è stato mai registrato e, ragionevolmente, non può essere raggiunto nello Stretto di Messina. Si tratta di un limite che non è mai stato raggiunto nello Stretto di Messina e in Italia.

Del resto, in occasione dell'esercitazione antisismica del 2022 i massimi rappresentanti dell'INGV e della Protezione Civile hanno affermato che la sismicità dello Stretto non è un problema per la realizzazione del Ponte e gli stessi ricercatori che hanno applicato il metodo neo-deterministico sono pervenuti a conclusioni analoghe.

La situazione geologica e geostrutturale dell'area interessata dalla costruzione del ponte sono rappresentate nelle figure che seguono.

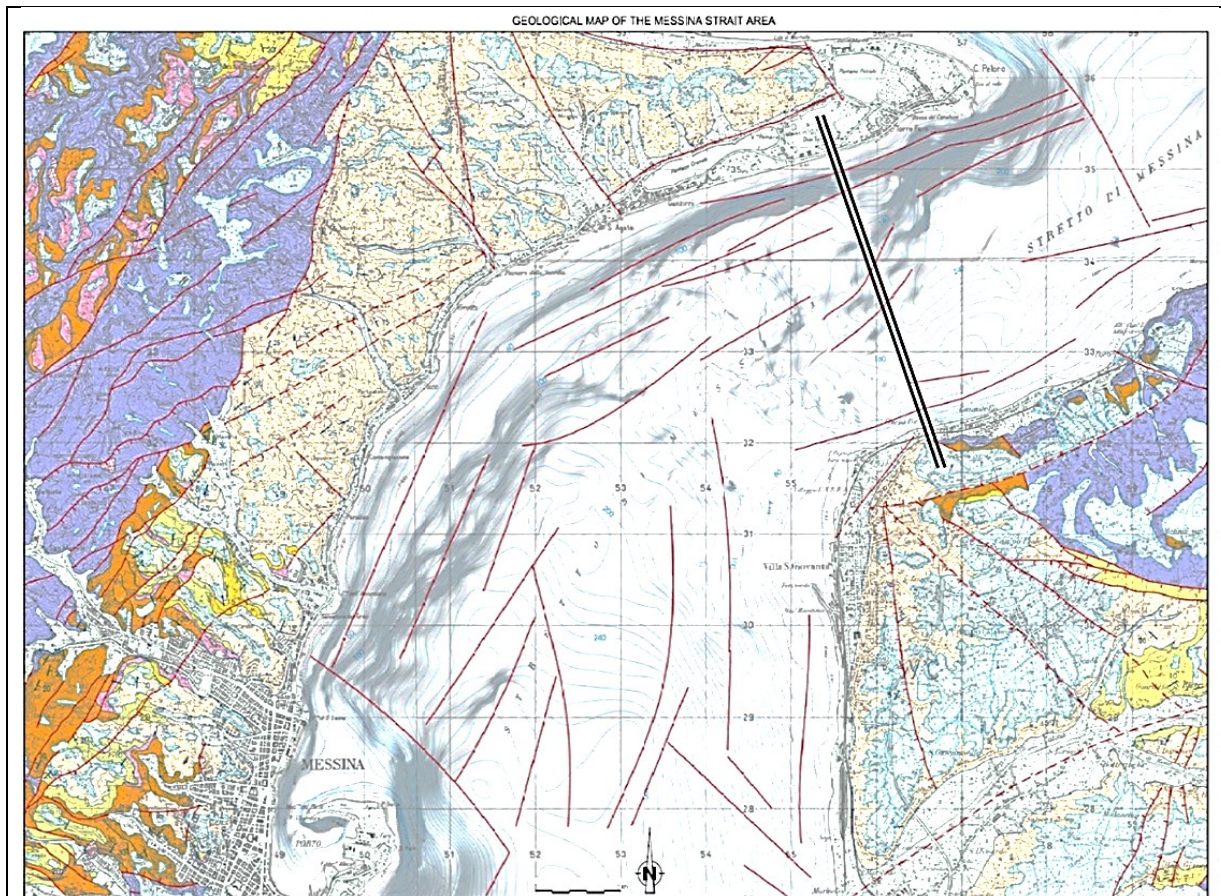


Fig.6. Carta geologica di dettaglio dello Stretto di Messina nella zona di attraversamento

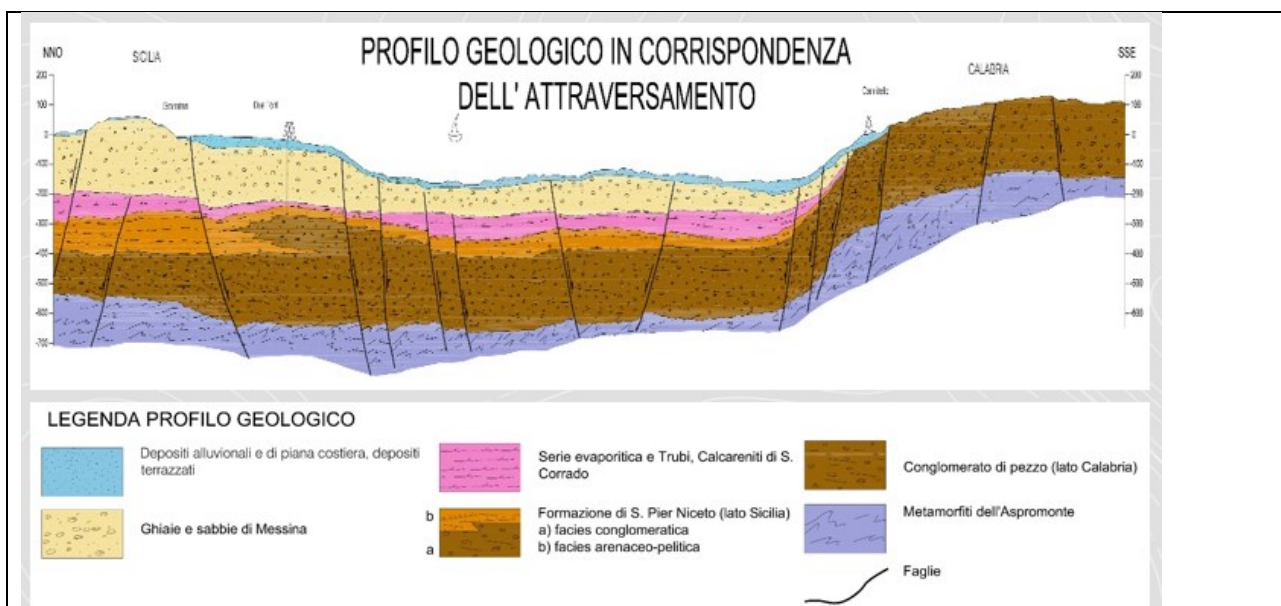
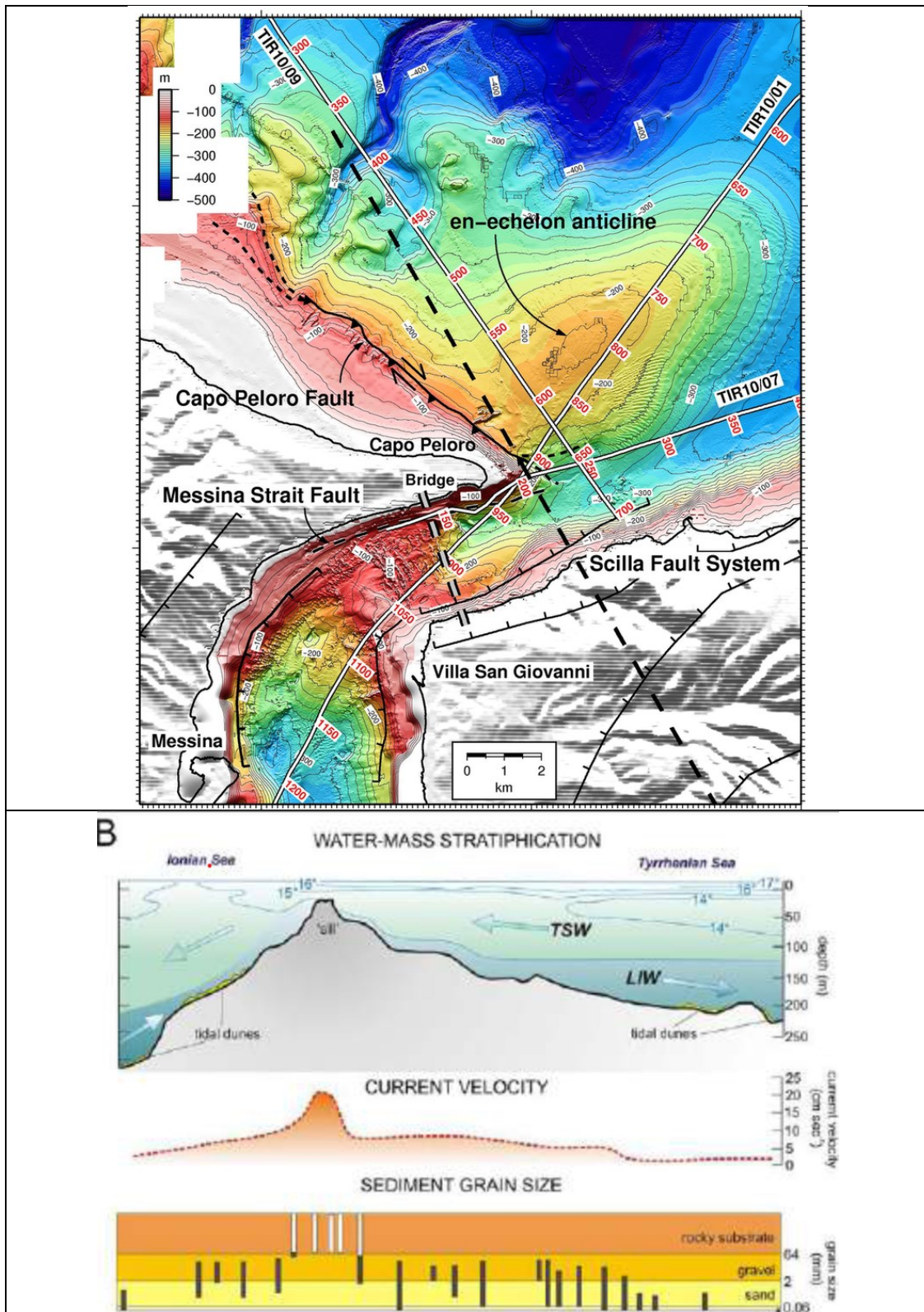


Fig.7. Sezione geologica lungo la linea di attraversamento

Pe la stessa zona sono note anche la morfo-batimetria e le geostrutture (C. Doglioni e al.).



In definitiva, le ricerche hanno migliorato le conoscenze geologico-strutturali e sismotettoniche dello stretto di Messina, e gli studi sul potenziale sismogenetico della *master fault* che ormai fanno parte del patrimonio scientifico, sono il riferimento ineludibile per la progettazione del ponte sullo Stretto.

Bibliografia essenziale

- Bertolaso G., Boschi E., Guidoboni E. Valensise (2008) –“Il Terremoto e il maremoto del 28 Dicembre 1908: analisi sismologica, impatto, prospettive” INGV-DPC, Roma-Bologna,
- Bonini L., Di Bucci, G. Toscani, S. Seno, G. Valensise (2010). Reconciling deep seismogenic and shallow active faults through analogue modeling: the case of the Messina Straits (Southern Italy). *Struct. Geol.*
- Boschi, E., D. Pantosti, G. Valensise (1989). Modello di sorgente per il terremoto di Messina del 1908 ed evoluzione recente dell'area dello Stretto. Atti 8 _ Meeting G.N.G.T.S., Roma 1989.
- Brancaleoni F., Diana G., Faccioli E., Fiammenghi G., Firth I.P.T., Gimsing N. J. Jamiolkowski M., Slutska P., Solari G., Valensise G., Vullo E. (2009). *The Messina Strait Bridge: A Challenge and a Dream*. CRC Press Taylor and Francis Group,
- Carminati, E., Negredo, A.M., Valera, J.L., Doglioni, C., 2005. Subduction-related intermediate-depth and deep seismicity in Italy: insights from thermal and rheological modeling. *Phys. Earth Planet.*
- Cuffaro M., Riguzzi F., Scrocca D., Doglioni C. 2010. Coexisting tectonic settings: the example of the southern Tyrrhenian Sea. *Int. J. Earth Sci.*
- Doglioni C., Ligi M., Scrocca D., Bigi S., Bortoluzzi G., Carminati E, Cuffaro M., D’Oriano F., Forleo V., Muccini F., Riguzzi F. (2012). The tectonic puzzle of the Messina area (Southern Italy): Insights from new seismic reflection data. *Scientific Reports, Nature*, 2
- Finetti I ; Lentini F. Carbone S. Catalano S e Del Ben A. (1996) -“Il sistema Appennino Meridionale-Arco Calabro-Sicilia nel Mediterraneo Centrale: studio geologico-geofisico” *Mem. Soc. Geol. It.* Vol. 115
- Guarnieri P, Di Stefano A., Carbone S., Lentini F. & Del Ben a. (2004) –“A multidisciplinary approach to the reconstruction of the Quaternary evolution of the Messina Strait. With Geological map of the Messina Strait, Scala 1:25.000” In *Mapping Geology in Italy*, Ed. APAT,
- Guidoboni E., A. Muggia e G. Valensise (2000). Aims and methods in Territorial Archaeology: possible clues to a strong IV century A.D. earthquake in the Straits of Messina (southern Italy) in: B. McGuire, D. Griffiths e I. Stewart. *The Archaeology of geological catastrophes*, *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 171.
- Longhitano, S.G. (2018). Between Scylla and Charybdis (part 2): The sedimentary dynamics of the ancient, Early Pleistocene Messina Strait (central Mediterranean) based on its modern analogue. *Earth-Science Reviews*, 179,
- Mandaglio G. (2016) *Ricerche geologiche per la difesa del suolo e la pianificazione di bacino in provincia di Reggio Calabria (Artemis, Reggio Calabria)*
- Valensise g. (2005) – “Evoluzione morfostrutturale quaternaria dell’area dello Stretto sollevamenti e spostamenti relativi in base ai dati geologici e strumentali” *Giornata di studio sul progetto del Ponte sullo Stretto di Messina*.
- Valensise G, Basili R., P. Burrato (2008) - La sorgente del terremoto del 1908 nel quadro sismotettonico dello Stretto di Messina. In: “Terremoto di Messina del 1908. Sorgente sismogenetica”. *Dip. Protezione Civile, Ist. Naz. Geofisica e Vulcanologia*.
- Stretto di Messina S.p.A. Progetto preliminare per il ponte sullo Stretto, 2005
- Eurolink S.p.A. Progetto definitivo del ponte sullo Stretto. 2011